



**MTA SZTAKI**

Magyar Tudományos Akadémia  
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet



**BUDAPESTI MŰSZAKI  
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta

---

Általános és Felsőgeodézia Tanszék

# Mozgó jármű helyzetének és tájolásának meghatározása alacsony árú GNSS és inerciális érzékelők szoros csatolású integrációjával

Farkas Márton

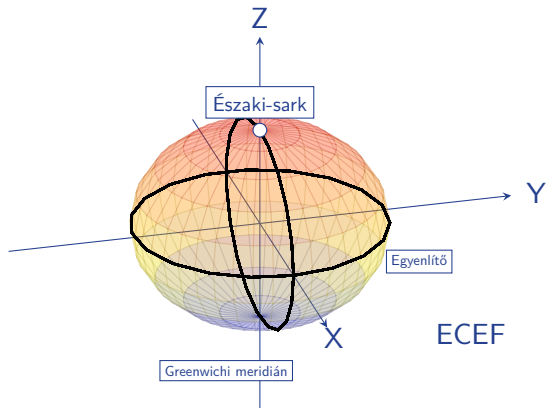
Rédey István Geodéziai Szeminárium

2019. április 2.

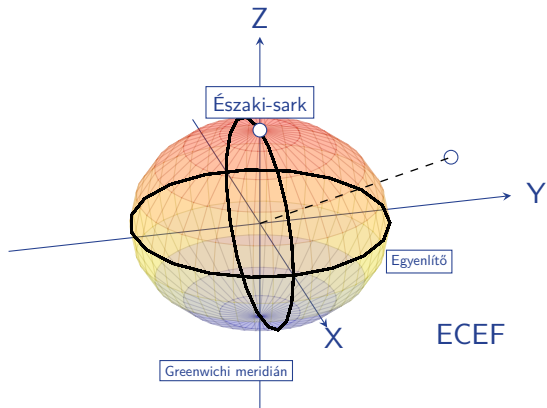
# Áttekintés

- ▶ Kutatási terület bemutatása
- ▶ Kiterjesztett Kálmán-szűrőn alapuló becselő algoritmus
- ▶ Ciklustöbbségtelműség feloldása
- ▶ Mérési eredmények
- ▶ Összegzés

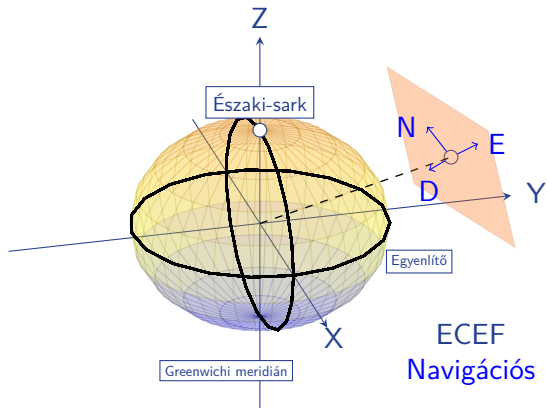
# Koordináta-rendszerek



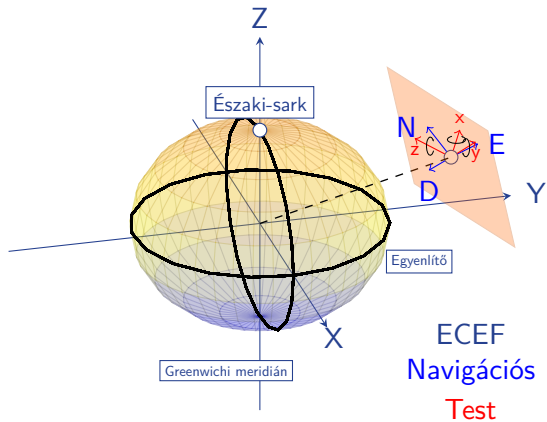
# Koordináta-rendszerek



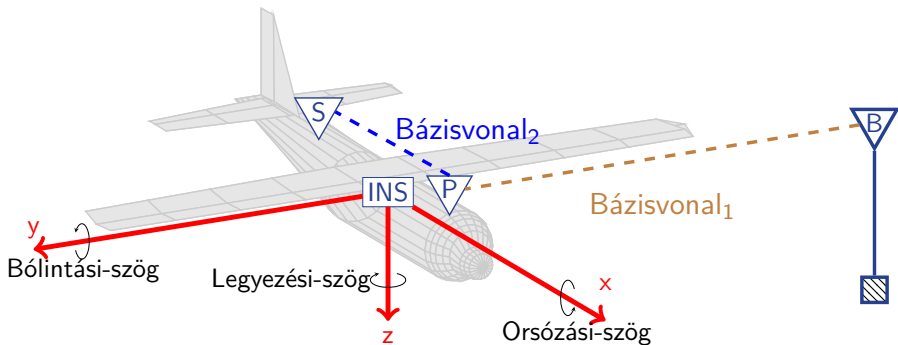
# Koordináta-rendszerek



# Koordináta-rendszerek

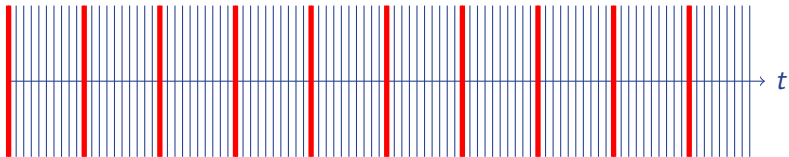


# Kutatási terület bemutatása



# Kutatási terület bemutatása

## ▶ Szenzorfúziós eljárások



Különböző mérési frekvenciák

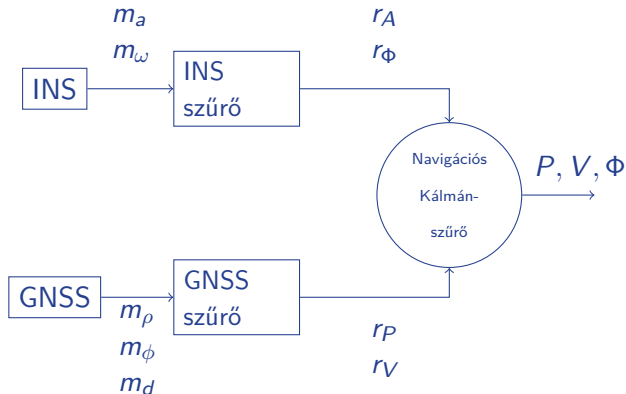
- ▶ INS: 50-2000 Hz
- ▶ GNSS: 1-50 Hz

Különböző mérési hibaforrások



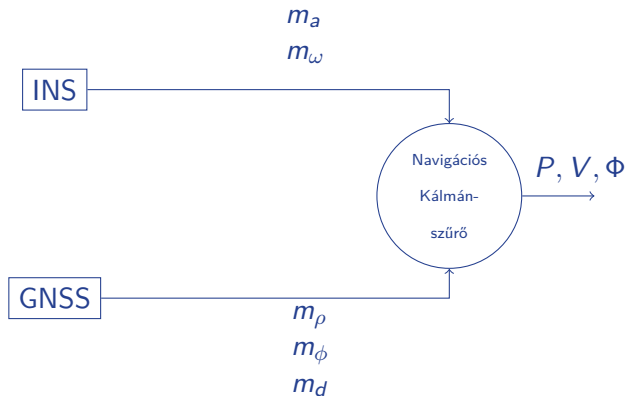
# Kutatási terület bemutatása

## Laza csatolású GNSS/INS szenzorfüzió



# Kutatási terület bemutatása

Szoros csatolású GNSS/INS szenzorfüzió



# Kiterjesztett Kálmán-szűrőn alapuló becslő algoritmus

Állapotvektor és kovarianciamátrix ( $x, P$ )

- ▶ Az elsődleges GNSS antenna pozíciója ( $\vec{X}_p$ ), sebessége ( $\vec{V}_p$ ) és gyorsulása ( $\vec{A}_p$ ) ECEF koordináta-rendszerben
- ▶ Orientációs kvaterniók ( $\vec{q}$ ) és deriváltjaik ( $\dot{\vec{q}}$ )
- ▶ Gyorsulásmérő bias hibája ( $\vec{b}_a$ ), szögsebességmérő bias hibája ( $\vec{b}_\omega$ )
- ▶ GNSS vevők órahibái ( $\delta^{GPS}, \delta^{GLO}, \delta^{GAL}$ )
- ▶ GNSS vevők óradiftjei ( $\dot{\delta}^{GPS}, \dot{\delta}^{GLO}, \dot{\delta}^{GAL}$ )
- ▶ Egyszeres különbségben vett GLONASS inter-channel bias ( $ICB$ )
- ▶ Egyszeres különbségben vett ciklustöbbértelműségek ( $N_{RB}$ )

# Kiterjesztett Kálmán-szűrőn alapuló becslő algoritmus

► Predikció

$$\hat{x}_t = F_{t-1}^t x_{t-1}$$
$$\hat{P}_t = F_{t-1}^t P_{t-1} F_{t-1}^{tT} + Q_t$$

► Frissítés

$$K_t = \hat{P}_t H_t^T (H_t \hat{P}_t H_t^T + R_t)^{-1}$$
$$x_t = \hat{x}_t + K_t (z_t - h(\hat{x}_t))$$
$$P_t = (I - K_t H_t) \hat{P}_t$$

# RTK alapú hely- és helyzetmeghatározás

- ▶ Vevő-Műhold távolság

$$\vec{l}_b = \vec{X}_b - \vec{X}^S$$

$$\vec{l}_p = \vec{X}_p - \vec{X}^S$$

$$\vec{l}_s = (\vec{X}_p + R_{body}^{ecef} \vec{b}_{p_{body}}^s) - \vec{X}^S$$

- ▶ Vevő-Műhold sebesség különbségek

$$\vec{v}_b = \vec{0} - \vec{V}^S$$

$$\vec{v}_p = \vec{V}_p - \vec{V}^S$$

$$\vec{v}_s = \vec{V}_p + R_{body}^{ecef} \text{skew}(2W_q^T \vec{q}) \vec{b}_{p_{body}}^s - \vec{V}^S$$

- ▶ Műholdirányú egységvektor

$$\vec{E} = \frac{\vec{l}^T}{\|\vec{l}\|}$$

# RTK alapú hely- és helyzetmeghatározás

- ▶ Kódmérés

$$\rho = \vec{E}\vec{l} + c\delta_r - c\delta^S - c\delta^{rel} - c\delta^{GD} + I + T$$

- ▶ Doppler-mérés

$$d = -\frac{1}{\lambda}(\vec{E}\vec{v} + c\dot{\delta}_r - c\dot{\delta}^S)$$

- ▶ Fázismérés

$$\lambda\phi = (\vec{E}\vec{l} + c\delta_r - c\delta^S - c\delta^{rel} - c\delta^G D - I + T + ch_{no}ICB) + \lambda N$$

# RTK alapú hely- és helyzetmeghatározás

- ▶ Egyszeres különbség képzése a bázisvonal két vevője között

$$\rho_{RB} = \rho_R - \rho_B$$

$$d_{RB} = d_R - d_B$$

$$\phi_{RB} = \phi_R - \phi_B$$

- ▶ Kétszeres különbség képzése egyszeres különbség értékek és a pivot műhold között

$$\rho_{RB}^{1\dots n,i} = \rho_{RB}^{1\dots n} - \rho_{RB}^i$$

$$d_{RB}^{1\dots n,i} = d_{RB}^{1\dots n} - d_{RB}^i$$

$$\phi_{RB}^{1\dots n,i} = \phi_{RB}^{1\dots n} - \phi_{RB}^i$$

# Inerciális szenzorok

## ► Gyorsulásmérő

Test koordináta-rendszerben mért gyorsulás adatok

$$\vec{a} = R_{body}^{cecf}{}^T \vec{A}_p - \text{skew}(2W_q^T \vec{q}) \text{skew}(2W_q^T \vec{q}) \vec{b}_{pbody}^{INS} + \vec{b}_a$$
$$- R_{body}^{nav}{}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + R_{body}^{cecf}{}^T \left( 2 \text{skew} \left( \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_E \end{bmatrix} \right) \vec{V}_p \right)$$



# Inerciális szenzorok

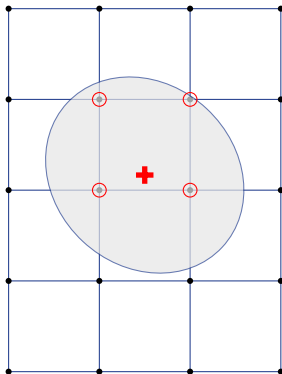
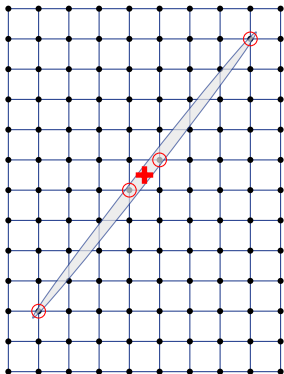
► Szögsebességmérő

$$\vec{\omega} = 2\vec{q} \cdot \dot{\vec{q}} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{b}_\omega \end{bmatrix} + \left[ R_{body}^{ecef^T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_E \end{bmatrix} + R_{body}^{nav^T} \omega_{ecef_{nav}}^{nav} \right]$$

# Ciklustöbértelműség feloldása

- ▶ A centiméteres pontosság elérésének feltétele
- ▶ Kerekítés, sigma-módszer, bootstrapping
- ▶ Legelterjedtebb a LAMBDA eljárás
  - ▶ Dekorrelációs eljárás a hatékony keresés érdekében

$$\check{x}_N = \arg \min_{x_N \in \mathbb{Z}^m} \|x_N - \hat{x}_N\|_{\hat{P}_{NN}}^2$$



# Ciklustöbbsértelműség feloldása orientációbecslésnél

- ▶ Az optimalizációba bevisszük az ismert kvaternió normát
- ▶ Nemkonvex optimalizációs probléma

$$\check{x}_N = \arg \min_{x_N \in \mathbb{Z}^m} (C(x_N))$$

$$C(x_N) = \|x_N - \hat{x}_N\|_{\hat{P}_{NN}}^2 + \|\hat{x}_q(x_N) - \check{x}_q(x_N)\|_{\hat{P}_{q(N)q(N)}}^2$$

- ▶ Feltételes kvaterniók és kovarianciamátrix

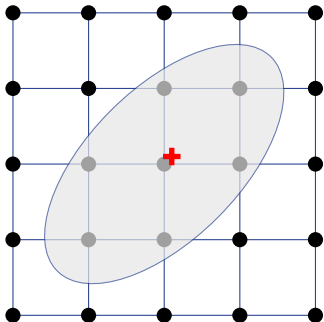
$$\hat{x}_q(x_N) = \hat{x}_q - \hat{P}_{qN} \hat{P}_{NN}^{-1} (x_N - \hat{x}_N)$$

$$\hat{P}_{q(N)q(N)} = \hat{P}_{qq} - \hat{P}_{qN} \hat{P}_{NN}^{-1} \hat{P}_{Nq}$$

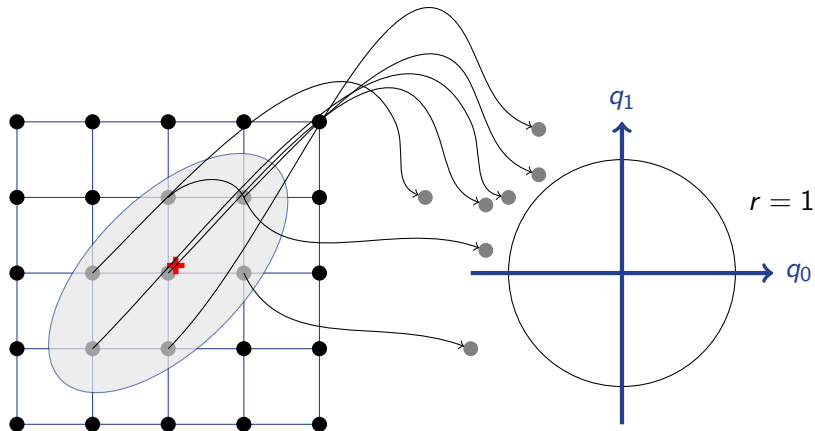
- ▶ Második optimalizáció

$$\check{x}_q(x_N) = \arg \min_{\|x_q\|^2=1} \|\hat{x}_q(x_N) - x_q\|_{\hat{P}_{q(N)q(N)}}^2$$

# Ciklustöbbértelműség feloldása orientációbecslésnél

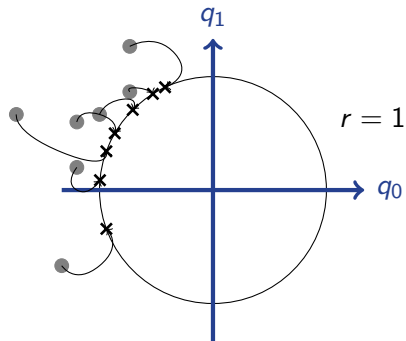
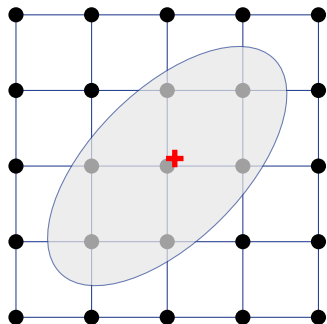


# Ciklustöbbértelműség feloldása orientációbecslésnél



$\hat{x}_N$ : +     $x_N$ : ●     $\hat{x}_q(x_N)$ : ●     $\check{x}_q(x_N)$ : ×

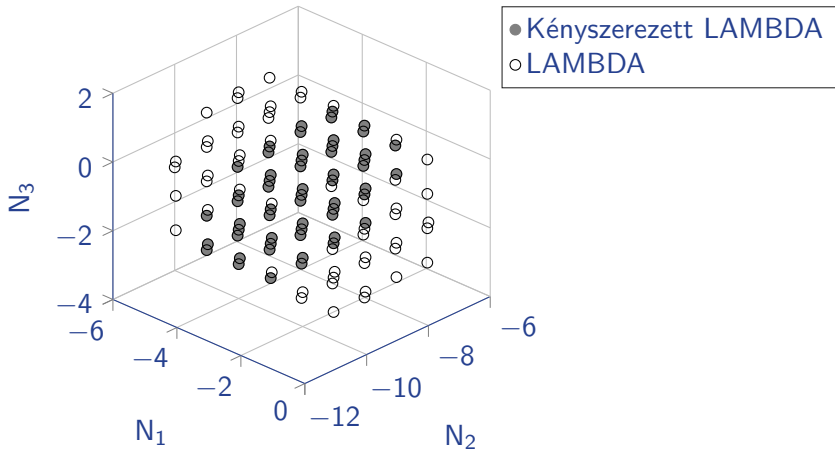
# Ciklustöbbértelműség feloldása orientációbecslésnél



$\hat{x}_N$ : +     $x_N$ : ●     $\hat{x}_q(x_N)$ : ●     $\check{x}_q(x_N)$ : ×

# Ciklustöbbségtelműség feloldása orientációbecslésnél

## ► 3D-s példa



# Ciklustöbbsértelműség feloldása orientációbecslésnél

- ▶ Eredeti optimalizációs probléma megoldása számításigényes
- ▶ A keresési tér alsó és felső korlátfüggvénye

$$C_1(x_N) = \|x_N - \hat{x}_N\|_{\hat{P}_{NN}}^2 + \xi_{min}(\|\hat{x}_q(x_N)\| - 1)^2$$

$$C_2(x_N) = \|x_N - \hat{x}_N\|_{\hat{P}_{NN}}^2 + \xi_{max}(\|\hat{x}_q(x_N)\| - 1)^2,$$

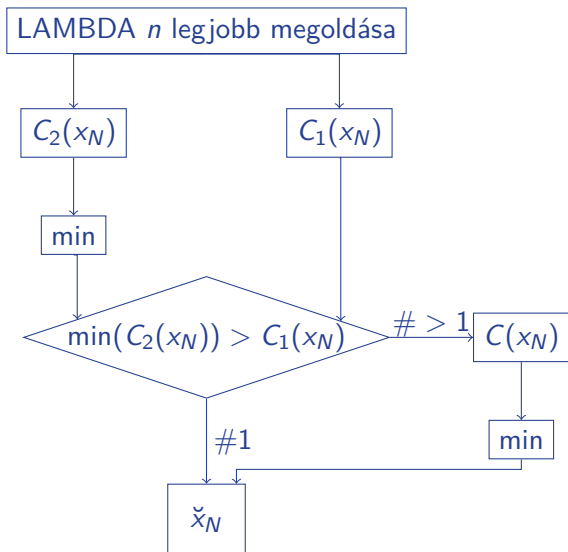
ahol

$$\xi_{min} = \min(\text{eig}(\hat{P}_{q(N)q(N)}^{-1}))$$

$$\xi_{max} = \max(\text{eig}(\hat{P}_{q(N)q(N)}^{-1}))$$



# Ciklustöbbértelműség feloldása orientációbecslésnél



# UAV teszt repülés

## Nyers adatok

- ▶ GNSS: Ublox NEO-M8T vevők
- ▶ INS: PIXHAWK INS

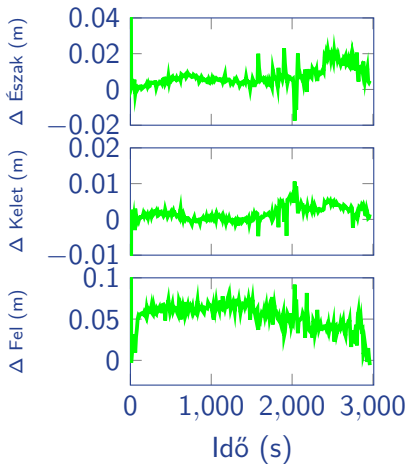
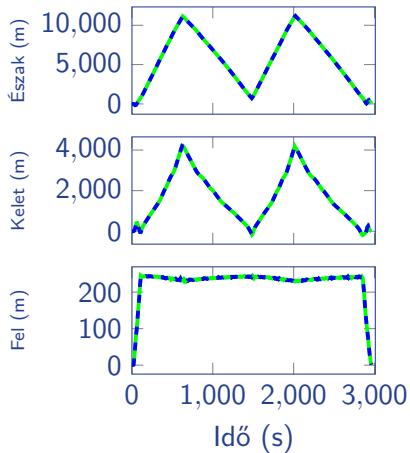
## Összehasonlítás

- ▶ Pozíció: RTKLIB
- ▶ Orientáció: PIXHAWK megoldás és PIX4D megoldás

# UAV teszt repülés

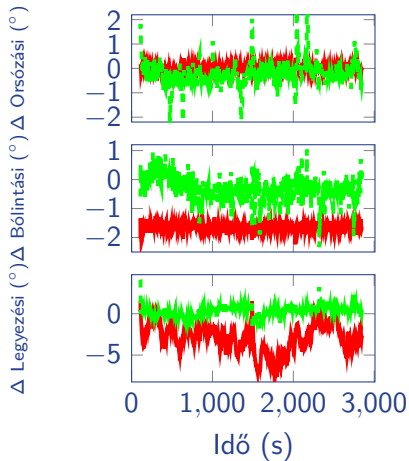
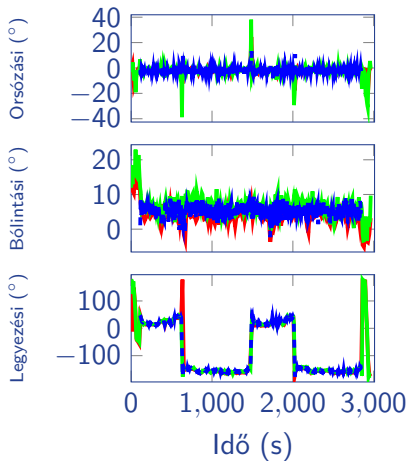


# UAV teszt repülés



EKF alg. (—), RTKLIB (---) és különbségük ( $\Delta$ )

# UAV teszt repülés



PIXHAWK (—), EKF alg. (—), Pix4D (- - -) és a Pix4D megoldástól vett különbségek PIXHAWK (—), EKF alg. - - -

# UAV teszt repülés

		Észak	Kelet	Fel
Fixed pozíciók különbségei [m]	mean	0.007	0.002	-0.053
	rms	0.010	0.003	0.055
AR aránya Bázisvonal <sub>1</sub>	99.12%			
		Orsózási	Bólintási	Legyezési
PIXHAWK - PIX4D Euler-szögek	mean	0.02	-1.63	-3.06
	rms	0.10	1.64	3.52
EKF algo. - PIX4D Euler-szögek	mean	-0.21	-0.26	0.27
	rms	0.53	0.49	0.62
AR aránya Bázisvonal <sub>2</sub>	97.35%			

# Algoritmus fejlődése

- ▶ Bázistávolság becslése
- ▶ Euler-szögek becslése
- ▶ Inerciális szenzorok
- ▶ Kvaterniók becslése

# Összegzés

- ▶ Szoros csatolású GNSS/INS szenzorfüziós eljárás
- ▶ Kvaternió kényszerezett ciklustöbbsértelműség-feloldás a mozgó bázison
- ▶ Jövőbeli tervek
  - ▶ Több bázisvonal a mozgó bázison
  - ▶ Két frekvenciás vevő alkalmazása
  - ▶ Több INS szenzor alkalmazása
  - ▶ PPP pozicionálás
  - ▶ Alapszintű kamera alapú tájolás integrálása
  - ▶ Tesztek